

## Gaia – a következő évtized nagy űrcsillagászati projektje

Szabados László

MTA Konkoly Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete

### Bevezetés

Az ESA 1989–1993 között működött Hipparcos asztrometriai űrmissziójának sikerén felbuzdulva, valamint a Hipparcos eredményei alapján megválaszolhatatlan kérdések hatására az Európai Űrügynökség újabb űr-asztrometriai küldetést készít elő. A 2012-ben felbocsátandó Gaia szonda nagyságrendekkel múlja felül elődjét a mérendő objektumok számát és a mérési pontosságot illetően, továbbá a térbeli mozgás leírásához szükséges, eddig jellemzően hiányzó adat, a vizsgált égitestek radiális sebessége is megállapítható a Gaia méréseiből.

Az asztrometriát – pozíciós csillagászatot – még a csillagászok egy része is idejét múlt vizsgálati területnek, a klasszikus csillagászat részének tekinti. Rajtuk kívül a nagyközönségben sem tudatosul, hogy a modern csillagászat látványos eredményeit nem lehetett volna elérni pontos asztrometria nélkül. Valamely égitest luminozitásának ismeretéhez tudnunk kell, hogy milyen távorról érkezik a sugárzása, legyen szó akár gammakitörésről, akár röntgensugárzó fekete lyukról, akár pulzáló fehér törpéről, vagy porburokba ágyazott vörös óriáscsillagról. A kozmikus távolságmeghatározás alapja pedig a parallaxismérés, amihez az égitestek pontos koordinátáinak és koordinátaváltozásainak ismerete kell.

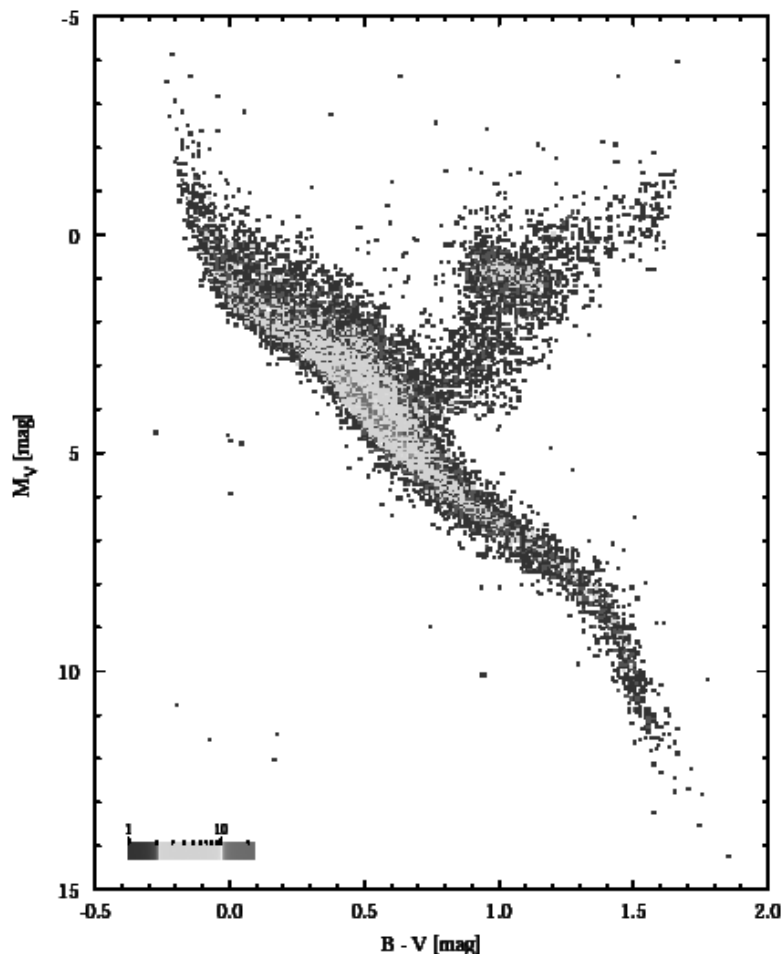
Az asztrometria azonban nemcsak ezért maradt a csillagászat alapvető része még napjainkban is. Az egyre nagyobb csillagászati távcsövekkel és érzékenyebb detektorokkal egészen halvány csillagok és extragalaxisok is vizsgálhatókká váltak. A jelenlegi legteljesebb csillagászati katalógus, az USNO B1.0, több mint egymilliárd objektum koordinátáit tartalmazza. A halvány égitestek pedig csakis a pontos pozíció és sajátmozgás ismeretében azonosíthatók.

Az asztrometria fontosságát jelzi továbbá az a tény is, hogy az asztrofizikai, kozmológiai, napkutató és bolygókutató űrszondák mellett asztrometriai célú űreszköz is működött már: az Európai Űrügynökség (ESA) *Hipparcos* szondája (Perryman 2009).

### Röviden a Hipparcosról

Az 1989 augusztusában pályára állított Hipparcos szonda 1993 márciusáig végezte méréseit, amelyekből 118000 csillag öt alapvető asztrometriai jellemzőjét határozták meg: a programcsillagok égi pozícióját leíró rektaszcenziót és deklinációt, a két koordinátairány menti elmozdulásra jellemző sajátmozgásadatokat, valamint a trigonometriai parallaxisukat. Ez utóbbiból közvetlenül számítható a csillag távolsága. A Hipparcos méréseiből viszonylag pontosan meghatározott luminozitású csillagok szín-fényesség diagramját mutatja az *1. ábra*. És mivel az asztrometriai űrszonda három és fél éven át végzett pozíciómérései során minden alkalommal rögzítette a programcsillagok fényességét is, a változócsillagokkal foglalkozók számára is hasznos a Hipparcos-katalógus (ESA 1997) (*2. ábra*).

A földi asztrometriai távcsövekkel végzett méréseknél a látómezőben levő többi csillaghoz viszonyított elmozdulás alapján határozzák meg a kiszemelt objektum parallaxisát. E módszer pontossága nagyon korlátozott, mert a „háttércsillagok” nincsenek a végtelenben, ezért azok trigonometriai parallaxisa sem nulla, bár az egyszerűség kedvéért annak veszik. Továbbá a légköri differenciális refrakció meghamisítja a mért szögműkönségeket, a légkör nyugtalansága (szcintilláció) pedig lerontja a szögmérés pontosságát. Az asztrometriai űrszondával két eltérő égi irány környezetében levő csillagok helyzetét mérték, mégpedig minden csillag koordinátáit az összes többiéhez (azaz 118000 másikhoz) viszonyítva, és ebből a monumentális adathalmazból kellett megfelelő matematikai módszerekkel megállapítani a programcsillagok koordinátáin kívül a sajátmozgás és a parallaxis értékét is minden mért objektumra (van Leeuwen 2007).



1. ábra. A Hipparcos által mért legpontosabb távolságú csillagok szín-fényesség diagramja (az ESA nyomán)

### A Gaia tervezésének szempontjai

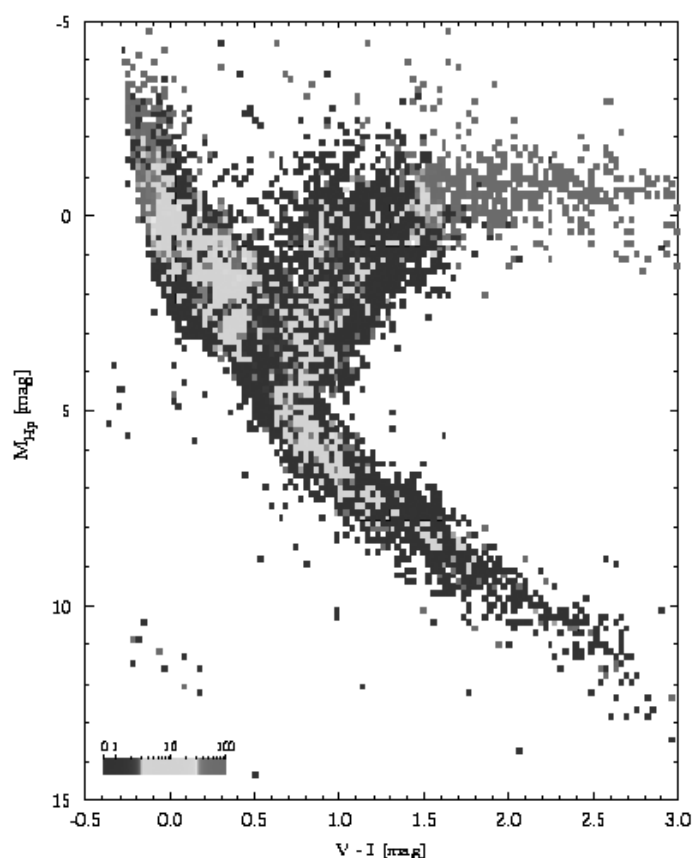
Amint a Hipparcos megmutatta az abszolút parallaxis meghatározásának lehetőségét, már az 1990-es években megkezdődött utódja, a Gaia asztrometriai űrszonda előkészítése. Az újabb generációs Gaia szondával elérendő célok első olvasásra talán meghökkentőek: 20 magnitúdóig az összes égitest detektálása a teljes égbolton (kb. egymilliárd csillag), a pozíciómérés pontossága pedig 10–25 milliomod ívmásodperc 15 magnitúdónál (a Hipparcos esetében a pontosság 1 ezred ívmásodperc volt 9 magnitúdónál). Hogy a Hipparcoséval összehasonlítva mennyivel teljesebb, pontosabb és mélyebb vizsgálatokat tesz lehetővé a Gaia, azt az 1. táblázat mutatja be részletesebben. A pontosság tehát 2 nagyságrendet javul, az érzékenység 4 nagyságrenddel lesz jobb, a vizsgált csillagok száma pedig 4 nagyságrenddel több.

A mérések alapelve azonos a Hipparcos esetében alkalmazott eljárással: két látóirány egyesítésével abszolút parallaxis meghatározása. Az égbolt 5 éven át tartó szkennelése lehetővé teszi a parallaxis és a sajátmozgás megbízható szétválasztását.

A Hipparcoshoz képest lényeges új elem, hogy a vizsgált égitestek térbeli mozgásának leírásához szükséges, eddig hiányzó látóirányú sebesség is megállapítható lesz a mérésekből, legalábbis a V sávban 16–17 magnitúdónál fényesebb objektumokra. Maguk a mérések rés nélküli spektroszkópiával történnek a Ca triplet körül a 847–874 nm hullámhossztartományban.

Az alacsony diszperziós színképből meghatározható a vizsgált objektumok fényessége, továbbá néhány diagnosztikus értékű asztrofizikai mennyiség, pl. a szín, az effektív hőmérséklet, a felszíni gravitációs gyorsulás, a légköri nehézelem-gyakoriság, de még a látóirányú csillagközi extinkció mértéke is. A rádiálissebesség-mérések alapján a térbeli mozgás harmadik komponense

mellett megállapítható lesz a vizsgált objektum perspektivikus gyorsulása is, de számos más alkalmazási terület is előre látható: dinamikai és populációs vizsgálatok, kettőscsillagok kimutatása és egyedi vizsgálata. A színeképből kinyerhető adatok lehetővé teszik továbbá a csillagok kémiai összetételének és rotációjának vizsgálatát is.



2. ábra. A változócsillagok gyakorisága a Hipparcos fotometriai mérései alapján. A leghidegebb csillagok mindegyikének változik a fényessége (az ESA nyomán).

1. táblázat.

	Hipparcos	Gaia
magnitúdóhatár	12	20 magnitúdó
teljesség	7,3–9,0	20 magnitúdó
fényes határ	0	6 magnitúdó
objektumok száma	120 000	26 millió $V = 15^m$ -ig, 250 millió $V = 18^m$ -ig, 1000 millió $V = 20^m$ -ig
effektív távolsághatár	1 kpc	50 kpc
kvázárok	1 (3C 273)	500000
galaxisok	Nincs	1000000
pontosság	0,001 ívmásodperc	7 mikroívmásodperc ( $V = 10^m$ ), 10–25 mikroívmásodperc ( $V = 15^m$ ), 300 mikroívmásodperc ( $V = 20^m$ )
fotometria	Kétszín-fotometria (B és V)	alacsony diszperziós spektrum $V = 20^m$ -ig
radiális sebesség	Nincs	1–10 km/s $V = 16$ – $17^m$ -ig
megfigyelési program	előre kiválasztva	Teljes és torzítatlan

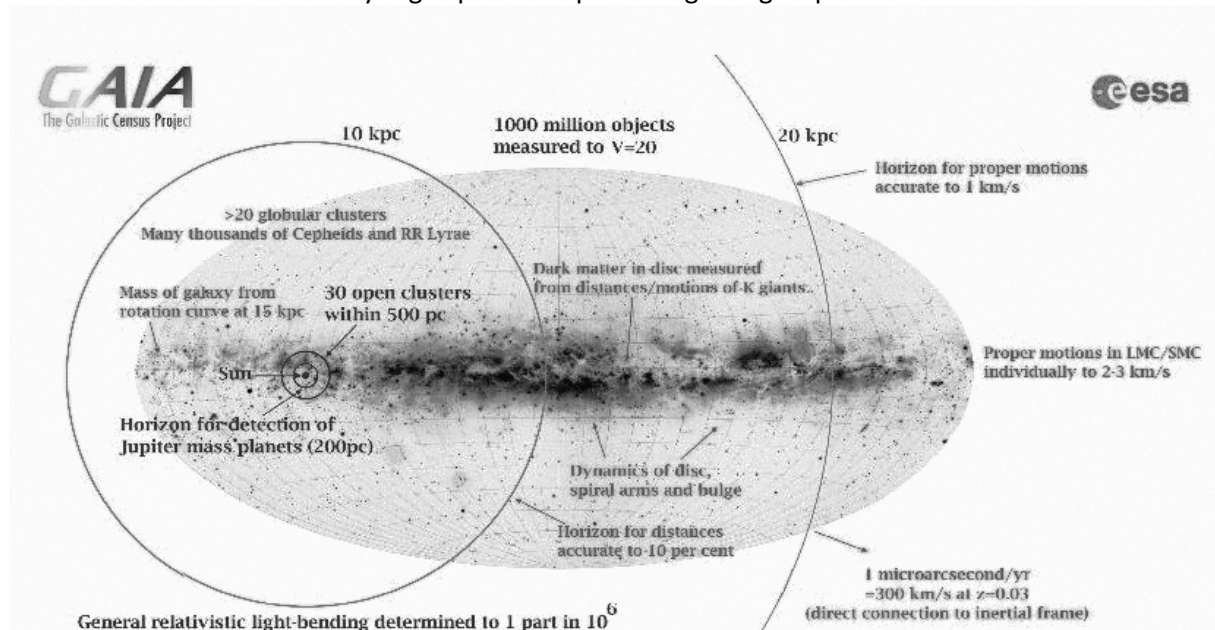
### Mit ad a Gaia az asztrofizika számára?

A Gaia mérései lehetővé teszik a csillagok luminozításának átfogó kalibrálását, egyebek között 1% pontos távolságok várhatók kb. 10 millió csillagra 2,5 kpc-en belül és 10% pontos távolságok 100 millió csillagra 25 kpc-en belül. Számos ritka típusú, ill. gyors fejlődési fázisban levő csillag luminozitása is végre ismertté válik. A kozmikus távolságskála megalkotásában alapvető szerepet betöltő távolságindikátorok (pl. cefeidák, RR Lyrae típusú csillagok) parallaxisát még a Magellán-felhőkben található ilyen csillagokra is meg lehet mérni.

A pontos távolságok alapján megállapítható lesz a Naphoz közeli csillagok tömegfüggvénye és luminozitási függvénye (több tízezer fehér törpe és barna törpe figyelembevételével), a csillagkeletkezési régiók tömeg- és luminozitási függvénye, a fősorozat előtti csillagok luminozitási függvénye. Továbbá a fotometriai idősorokból minden színképtípusú csillag változását detektálni és jellemezni lehet. Lényeges eredmény lesz, hogy pontos Hertzsprung–Russell-diagram készíthető az egész Tejútrendszerre vonatkozóan.

A csillagok fizikai jellemzőinek megállapításán túlmenően elkészíthető a Tejútrendszer háromdimenziós térképe nagyjából egymilliárd csillag alapján. Ez a következő információkat is magában foglalja: minden csillagpopuláció távolsága és sebességeloszlása, a korong és a haló térbeli és dinamikai szerkezete, keletkezésének története, a galaktikus sötét anyag eloszlásának részletes feltérképezése, a csillagszerkezetre és -fejlődésre vonatkozó elméletek szelektálása megfigyelési alapon, több ezer extraszoláris bolygó kimutatása teljes égfelmérés alapján. (3. ábra)

A Tejútrendszeren túli világra vonatkozóan is lényeges eredményekre lehet számítani: megbízható távolságstandardok a két Magellán-felhőben is, gyors riasztás tranziens források (szupernóvák, egyéb kitörések) esetén, kvazárok detektálása, vöröseltolódása és a kozmológia számára fundamentális mennyiségek példátlan pontosságú megállapítása.



3. ábra. A Gaia tudományos céljainak összefoglalása (az ESA nyomán)

### A Naprendszer vizsgálata a Gaia űrszondával

A naprendszerbeli égitestekkel kapcsolatban várható eredményeket csak felsorolásszerűen említjük:

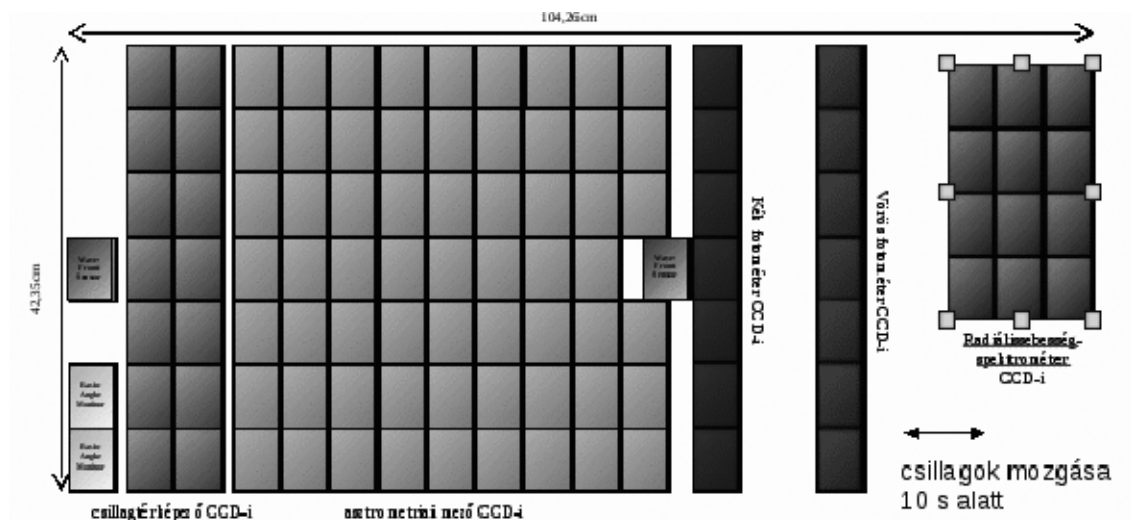
- a Naprendszer kb. negyedmillió kis égitestjének (főként főövbeli kisbolygók) felfedezése teljes égfelméréssel;
- minden mozgó objektum detektálása (20 magnitúdóig) homogén módon;

- a kis égitestek pályájának a jelenleginél 30-szor pontosabb meghatározása, még az egy évszázada ismert objektumok esetében is;
- a forgástengely irányának és a forgási periódus, ill. az alak meghatározása a többségre;
- a Mars, Föld és Vénusz esetleges trójai kísérőinek kimutatása;
- kb. 50 Kuiper-objektum felfedezése 20 magnitúdóig (kettősségük megállapítása, a plutónók kiválasztása közülük);
- kb. 50 kentauro felfedezése;
- kb. 500 további Föld-közelű objektum detektálása (jelenleg 2600 Amor, 3100 Apollo és 500 Aten típusú kisbolygó ismert), detektálási határ: 260–590 m, az albedótól függően.

### A Gaia jellemzői

A szonda teljes egészében ESA-misszió, indítása 2012 tavaszán várható Szojuz–Fregat típusú hordozórakétával. A 2120 kg indítási tömegű szondát a Nap–Föld rendszer L2 Lagrange-pontja körüli Lissajous-pályára juttatják. Az 5 évre tervezett működés esetleg 1 évvel meghosszabbítható. Az adattovábbítás sebessége 4–8 Mbps.

A fókusz síkban elhelyezendő CCD-mátrix geometriáját a 4. ábra mutatja. Az egyszerre detektálható terület: 0,75 négyzetfok. A mérés során szkennelt sáv szélessége: 0,7°.



4. ábra. A Gaia fókusz síkjában levő CCD-elemek elrendezése (Alex Short diagramja alapján)

Az adatok kiértékelése a Hipparcosnál bevált módon történik, globális asztrometriai redukálással:

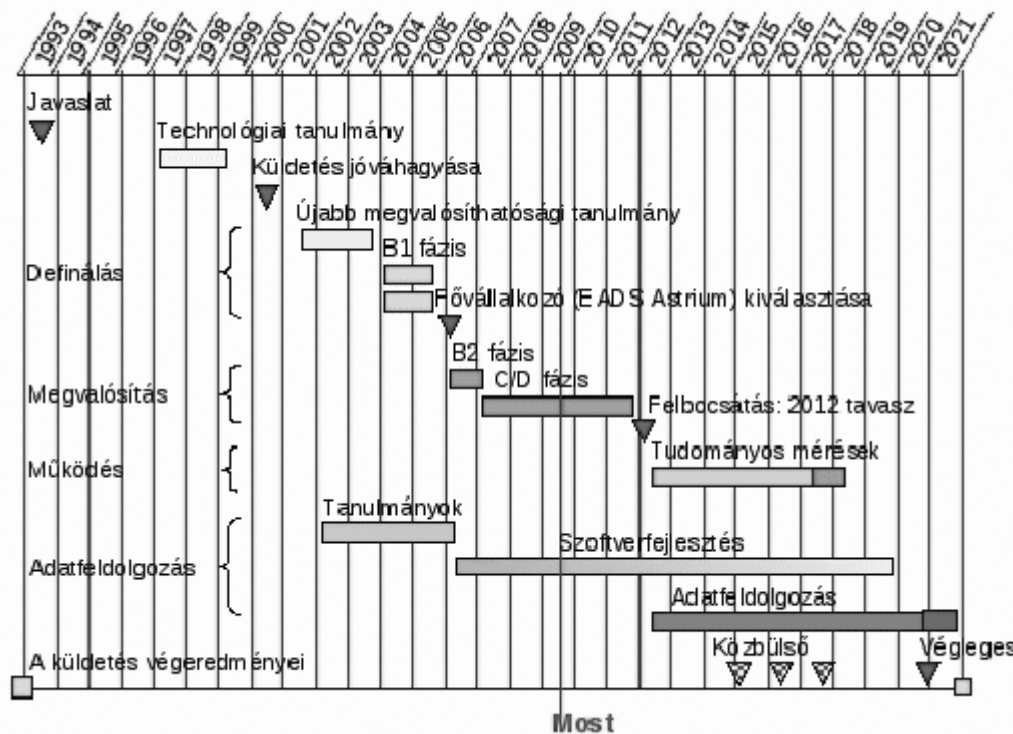
- objektumok megfeleltetése a különböző főkörök mentén;
- helyzet és kalibrálás frissítése;
- objektumok pozíciójára stb. megoldás;
- magasabb rendű tagok;
- újabb főkörök adatai;
- a rendszer iterálása.

Az adatfeldolgozást a mérések kezdetétől fogva folyamatosan végzik, az egyre újabb adatokkal fokozva az addig elért pontosságot. A végső katalógus nagyjából 2020-ra készül el, de közbülső katalógusokat is közzétesznek a lehetőség szerint. A Gaia-misszió tervezett időrendjét az 5. ábra foglalja össze.

### A Gaia szondához kapcsolódó tudományos szervezetek felépítése

A projekt tudományos vezetője a hét tagú Gaia Science Team (GST), melyhez csatlakozik az ESA Project Scientist és a Data Processing and Analysis Consortium (DPAC) vezetője (Executive Chair).

A DPAC keretében jelenleg 20 ország mintegy 400 kutatója vesz részt a Gaia-hoz kapcsolódó tudományos előkészítő munkában, pl. szimulációk, algoritmusok készítésében. Magyarországról az MTA KTM Csillagászati Kutatóintézetében működő Konkoly Observatory Gaia Team (KOGT – Szabados László témavezető, Kiss Zoltán Tamás és Klagyivik Péter, ESA PECS No. 98090 támogatással) vesz részt a munkában, elsősorban cefeidák viselkedésének tanulmányozásával és előrejelzésével. A szonda működése idején a földi kiegészítő mérésekben is részt vesz a KOGT cefeidák, illetve gyors fejlődési fázisban levő csillagok vagy más tranzienst források fotometriai megfigyelésével.



5. ábra. A Gaia misszió időrendi áttekintése (Michael Perryman és François Mignard diagramja alapján)

A DPAC tevékenysége ún. koordinációs egységekben (Coordination Unit, CU) folyik. Jelenleg 8 ilyen egység működik (CU1: System Architecture; CU2: Data Simulation; CU3: Core Processing; CU4: Object Processing; CU5: Photometric Processing; CU6: Spectroscopic Processing; CU7: Variability Processing; CU8: Astrophysical Parameters). A CU9-et (Catalogue Access) később hívják életre. A KOGT a CU7 keretében folytatja tevékenységét.

### Köszönetnyilvánítás

A KOGT munkájához az ESA PECS No.98090 projekt nyújt anyagi támogatást.

### Irodalom:

ESA 1997, Hipparcos Catalogue, ESA SP-1200

Perryman, M. 2009, Astronomical Applications of Astrometry, Cambridge Univ. Press

van Leeuwen, F. 2007, Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data, Astrophysics and Space Science Library 350, Springer